



8 – La bizarre disparité des instruments de la relativité restreinte

Jean Stratonovitch

► To cite this version:

Jean Stratonovitch. 8 – La bizarre disparité des instruments de la relativité restreinte. 2014. hal-01096136

HAL Id: hal-01096136

<https://hal.science/hal-01096136>

Preprint submitted on 16 Dec 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives| 4.0 International License

LA BIZARRE DISPARITÉ DES INSTRUMENTS DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Jean Stratonovitch

1 – LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET L'EXIGENCE DE FONDATION SUR L'INSTRUMENT ET L'EXPÉRIENCE

Dans son livre *la Relativité*¹, Einstein installe sa cinématique sur trois instruments : le corps rigide, le vérificateur de simultanéité et l'horloge.

En cela, il respecte ce que nous appelons l'exigence de fondation sur l'instrument et l'expérience². C'est pour lui une nécessité.

Deux conceptions s'opposent en effet quant à la forme d'existence qu'ont l'espace et le temps.

La première est celle de Newton. Elle domine la physique jusqu'au début du vingtième siècle. L'espace et le temps y sont pensés comme ayant une réalité physique absolue. Ce sont des « choses », qui ont à leur manière des qualités que la pensée aristotélicienne attribuait au monde supralunaire : l'immuabilité, l'incorruptibilité, la perfection.

Mais Einstein, justement, et continuateur en cela de Leibniz, récuse ce point de vue. Pour la relativité restreinte, espace et temps sont relatifs. Chaque observateur, chaque point de vue engendre son espace et son temps particuliers. Ce ne sont plus des universels immuables constitutifs de la trame du monde, ce sont simplement et pragmatiquement ce que nos instruments de mesure, supposés parfaits,

¹ EINSTEIN A., *la Relativité*, Petite bibliothèque Payot, 1991.

² J'étudie la question de la fondation sur l'instrument et l'expérience dans l'article *Cahier des exigences d'une axiomatisation de la cinématique*, hal-00993981.

nous renvoient selon les circonstances dans lesquelles ils sont considérés.

Du coup, la pensée newtonienne est prise au piège. Son espace et son temps absolus deviennent clairement des entités métaphysiques, effacées de la scène par la mise au premier plan des instruments, qui sont en l'occurrence les seules réalités physiques sur l'existence desquelles tout le monde est forcé d'être d'accord.

.....

2 – L'ÉTRANGE DISPARITÉ DES INSTRUMENTS EINSTEINIENS

Cela ne saute sans doute pas aux yeux, mais les trois instruments d'Einstein sont bizarrement disparates.

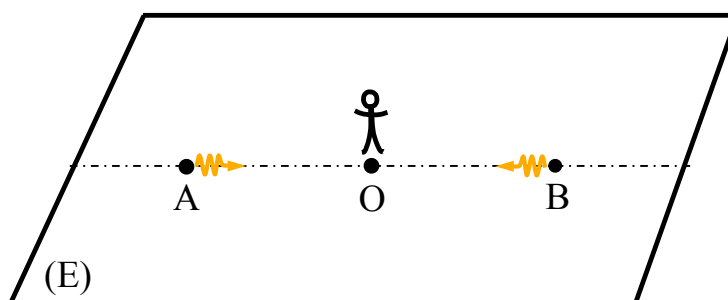
1) **Le corps rigide.** Il ne s'agit bien entendu pas du corps infiniment rigide, qui est incompatible avec la relativité restreinte, mais du corps élastiquement rigide. Einstein observe qu'une indication de lieu est dans un premier temps l'indication d'un point sur un corps rigide de référence, et que dans un deuxième temps on agrandit l'éventail des lieux désignables en utilisant des prolongements rigides de ce corps rigide de référence – l'exemple qu'il donne est celui d'une longue perche dressée verticalement place du Panthéon à Paris, dont l'extrémité désigne la position d'un nuage implicitement ponctuel. La perche commence par être effective, mais elle est bientôt remplacée par une perche virtuelle qui, si elle était effective, désignerait la position du nuage. Il est implicite également que cette mise en place imagée néglige le mouvement de rotation de la Terre, et que ce que nous donne Einstein est une définition d'un espace galiléen comme prolongement rigide non borné d'un corps rigide au repos galiléen. Il s'avère d'autre part – nous l'avons constaté dans *l'Instrument et l'expérience fondateurs de la géométrie*³ – que le corps élastiquement rigide est l'instrument nécessaire et suffisant de la géométrie. La règle à mesurer, cette autre occurrence du corps élastiquement rigide qu'utilise Einstein dans ses raisonnements, n'est pas un instrument nécessaire, mais elle est suffisante. Aussi le premier

³ hal-01069147

instrument mis en place par Einstein est un instrument adéquat, effectif, et défini sans équivoque.

2) Le « **vérificateur de simultanéité** ». Pour définir la simultanéité d'événements se déroulant en deux lieux A et B d'un espace galiléen (E), Einstein, au chapitre 8, utilise un observateur immobile dans (E) au milieu de ces deux points. Si cet observateur voit arriver simultanément (au sens, donc, de la simultanéité locale) des rayons lumineux émis en ces lieux lors de ces événements, c'est qu'ils sont simultanés.

Nous verrons ultérieurement que cette définition ne respecte pas le principe de minimalité et qu'il est possible d'en construire une plus économe et minimale. Mais les deux définitions munissent un espace galiléen isotrope d'une simultanéité identique, si bien que ce défaut est pour le moment sans importance.



Ce deuxième instrument d'Einstein est comme le premier adéquat, effectif et clairement défini.

3) **L'horloge**. En opposition à ces deux premiers instruments, le troisième, l'horloge, est totalement indéfini. Autant Einstein nous donne la « recette » opérationnelle pour construire les deux premiers, autant il nous laisse dans l'incapacité de construire une horloge. En outre, il est patent, tout au long de son ouvrage, qu'il l'assimile à un objet ponctuel. Et le même constat peut être fait dans ses autres écrits⁴. Or une horloge est un mécanisme, et tout mécanisme, quel qu'il soit, ne peut être explicité que détaillé dans l'espace, et ne peut donc être

⁴ EINSTEIN A., *Relativités*, Éd. du Seuil / Éd. du CNRS, 1993.

ponctuel. Plus généralement, d'ailleurs, aucune entité physique n'est infiniment petite, pas même une particule. L'infiniment petit n'existe pas, ce n'est rien d'autre qu'une fiction induite par l'emploi des nombres réels – emploi au demeurant incontournable, mais qui n'est pas sans inconvénient⁵.

Résumons les caractéristiques des instruments de la relativité restreinte dans le tableau qui suit, en y ajoutant le fait de fonder ou non leur statut sur des lois de la physique.

Rien n'existe qui soit infiniment petit, mais l'outillage mathématique idoine à la description de la réalité est fondé sur les nombres réels, dont le pouvoir de séparation infini manque radicalement de pertinence. Ces nombres induisent des entités infiniment petites dont l'inévitable mise en place est le « péché originel » de la physique. Ce « péché » doit être commis aussi peu que possible, et cette entité première de la cinématique qu'est le *point historicité*, infiniment petit, dont les instants personnels sont infiniment brefs, ne doit jamais avoir d'autres attributs que d'être un outil parfait de désignation des lieux et des instants locaux. Il ne peut porter en lui un mystérieux « temps propre », attribuable seulement à des entités non infiniment petites telles qu'une particule, un atome ou une horloge.

⁵ J'étudie cette question dans l'article *le Noyau premier*, hal-01064270.

Instrument de la géométrie : le corps (élastiquement) rigide	Instrument de la simultanéité : le « vérificateur de simultanéité »	Instrument fondateur de la mesure des durées : l'horloge
Parfaitement défini.	Parfaitement défini.	Non défini.
Dimensions non nulles.	Dimensions non nulles.	Traité comme un objet ponctuel, donc infiniment petit.
Modélise un objet existant.	Modélise un protocole possible dans le concret.	Ne modélise aucun objet qui puisse exister, puisque infiniment petit.
Fondé sur des lois de base de la physique : – la reproductibilité de la superposition durable : si deux corps élastiques, l'un et l'autre au repos galiléen, sont superposables, alors, ils le seront encore lors d'autres expériences menées dans les mêmes conditions ; – la transitivité de la superposabilité : Si \mathcal{A} est superposable à \mathcal{B} , et \mathcal{B} à \mathcal{C} , alors \mathcal{A} est superposable à \mathcal{C} . Cela fait de la superposabilité une relation d'équivalence, et construit les longueurs comme classes d'équivalence de bipoints.	Fondé sur des lois de base de la physique : – la constance de la vitesse de la lumière relativement à un espace galiléen isotrope (la relativité restreinte postule que tous les espaces galiléens sont isotropes) ; - les lois de la géométrie euclidienne.	N'est fondé sur aucune loi physique.

.....

3 – EST-IL POSSIBLE DE DÉFINIR L'HORLOGE EN TANT QU'INSTRUMENT EFFECTIF ?

Ainsi, sur les trois instruments qu'Einstein utilise, deux sont des instruments effectifs, et le troisième, l'horloge, est une fiction, une illusion d'instrument, un objet dont l'existence est impossible, qui délivre un « temps » qui n'est fondé sur aucune loi physique, et donc à proprement parler métaphysique, un temps semblable en cela à celui de Newton, à ceci près qu'il est purement local alors que le temps newtonien s'étendait à l'univers entier.

La première question que ce constat soulève est celle de savoir si Einstein pouvait faire autrement : existe-t-il des objets théoriques explicites, des machines élémentaires délivrant un temps dont la régularité se fonde sur des lois de base de la physique ? La réponse est qu'Einstein avait deux solutions « immédiates ».

1) L'horloge inertielle.

Galilée, dans son *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*⁶, donne du principe qui portera son nom une démonstration très élégante. Imaginons, dit-il en substance – et en italien – qu'un objet soit abandonné avec une certaine vitesse le long d'un plan incliné parfaitement glissant. Si sa vitesse est dirigée dans le sens de la pente, le mobile accélérera. Si au contraire elle est opposée à la pente, il ralentira. Il en résulte que si la pente est nulle, le mobile n'accélérera ni ne ralentira, et par conséquent que sa vitesse restera constante.

Ce raisonnement repose sur diverses prémisses. Que le contexte idéal du « zéro frottement » est non seulement légitime à envisager, mais encore que c'est lui qui définit le contexte théorique dans lequel il faut penser les lois premières de la dynamique. Qu'une action, aussi faible soit-elle, exercée sur un corps dans le sens de son mouvement l'accélère, et le ralentit si elle est exercée en sens inverse. Qu'un plan horizontal n'exerce aucune action ni dans un sens ni dans un autre. Qu'un passage à la limite entre les situations d'accélération et de décélération est possible.

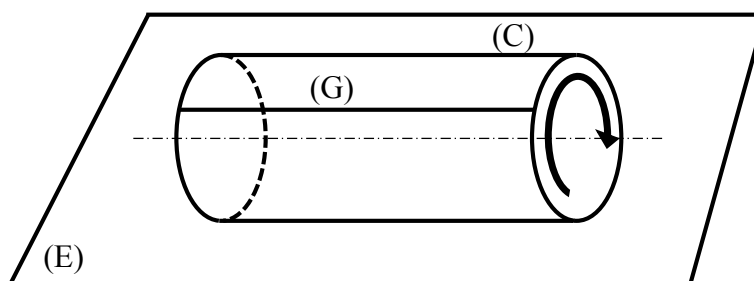
⁶ GALILEI G., *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, pp 58-64, Éd. du Seuil, coll. Sources du savoir, 1992.

Et aussi cette autre prémisse, plus dissimulée : le raisonnement invoque la notion de vitesse, donc de temps mesuré. Il dépend donc de la façon que nous avons de mesurer le temps. S'il est correct en utilisant un certain type d'horloges, il ne le sera plus avec des horloges qui mesureraient autrement le temps. Il définit par conséquent une catégorie d'horloges, celles pour lesquelles il est valable. Le temps qu'elles engendrent est celui pour lequel un objet animé d'un mouvement inertiel relativement à un espace galiléen est animé d'un mouvement uniforme. C'est le **temps inertiel**.

<p>Contrairement à l'usage habituel, qui réserve la qualification d'« inertiels » aux mouvements de translation libre, j'appelle aussi « inertiels » les mouvements de rotation libre d'un objet globalement immobile relativement à un certain espace galiléen.</p>
--

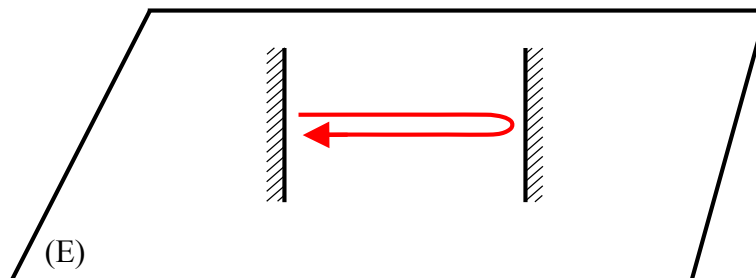
Ce temps est celui de la physique. C'est seulement avec lui, en effet, que la vitesse d'un objet en mouvement inertiel reste constante ; c'est donc seulement lui qui rend valides les lois de conservation de la quantité de mouvement, du moment cinétique et de l'énergie cinétique ; et donc aussi celle de la conservation de l'énergie en général.

Ainsi, le principe de Galilée contient une définition implicite du temps mesuré – c'est-à-dire une définition implicite de l'horloge : un objet en mouvement libre relativement à un espace galiléen, que ce mouvement soit de rotation ou de translation, est une horloge. Par exemple un cylindre de révolution (C) globalement immobile dans un espace galiléen (E) et tournant librement sur lui-même. Le comptage du nombre des tours d'une de ses génératrices (G) définit un temps régulier.



2) L'horloge à lumière

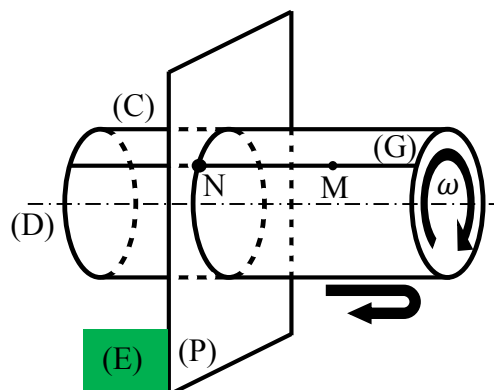
Le postulat de l'invariance de la vitesse de la lumière relativement à un espace galiléen isotrope donné – ou même seulement de l'invariance de sa vitesse moyenne lors d'un aller et retour – implique de la même manière une définition du temps mesuré, et permet donc de construire en théorie des horloges, par exemple en faisant faire des allers et retours à un rayon lumineux entre deux miroirs parallèles.



Ce deuxième modèle n'est pas anecdotique : il reproduit schématiquement un système d'ondes électromagnétiques stationnaires et délivre ainsi un rythme propre fonctionnant à l'analogie du rythme interne de la matière. Cette « horloge à lumière » est aussi fondamentale que la précédente.

L'horloge inertielle	L'horloge à lumière
Parfaitement définie.	Parfaitement définie.
Dimensions non nulles.	Dimensions non nulles.
Modélise un objet d'existence possible.	Modélise un objet d'existence possible.
Fondée sur une loi de base de la physique, l'uniformité des mouvements inertiels.	Fondée sur une loi de base de la physique, l'invariabilité des propriétés de la lumière dans un contexte invariable.

Lorsqu'elles sont l'une et l'autre immobiles relativement à un même espace galiléen, l'horloge inertielle tournante et l'horloge à lumière sont régulières l'une par rapport à l'autre, et donc équivalentes ; mais rien ne nous assure *a priori* qu'elles ont le même comportement lorsqu'on met l'une ou l'autre en mouvement. L'expérience d'aller et retour d'un cylindre en rotation⁷ (qui ne couvre toutefois pas tous les allers et retours possibles, puisque le cylindre doit croiser constamment un même plan immobile dans l'espace galiléen de référence) nous montre même le contraire : les points M et N font le même nombre de tours autour de l'axe, tandis qu'une horloge à lumière qui accompagnerait M ferait moins de tours qu'une restant immobile sur (P). La non-définition d'Einstein devient alors un point d'embarras : lorsqu'il parle d'horloge, quel type envisage-t-il, puisqu'il y en a plusieurs possibles, dont les propriétés ne sont pas les mêmes ?



4 - EN RELATIVITÉ RESTREINTE, EST-IL POSSIBLE DE DÉFINIR UNE HORLOGE EFFECTIVE ?

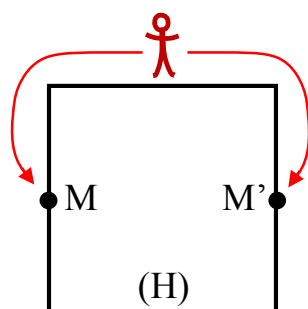
Mais ce n'est pas le seul problème soulevé par cette non-définition. Admettons que, d'une manière ou d'une autre, la relativité restreinte définisse une horloge avec la même efficacité que celle avec laquelle elle définit la règle à mesurer ou le protocole de vérification de la simultanéité. Cette horloge est donc un mécanisme produisant, en vertu de telle ou telle loi physique spécifique, des cycles réguliers

⁷ Elle est analysée dans l'article *le Paradoxe des jumeaux de Langevin et l'expérience d'aller et retour d'un cylindre en rotation*, hal-00954283, où le cylindre est donc une horloge. Cette expérience, loin d'être fortuite, est au contraire l'une des premières qui s'imposent à l'esprit dès qu'on a compris les manquements de la relativité restreinte à l'exigence de fondation sur l'instrument et l'expérience et qu'on décide d'y remédier en se donnant une définition opérationnelle de ce qu'est une horloge.

qui, par comptage, définissent des durées. Comme aucun mécanisme ne peut être de taille nulle, l'horloge a une certaine étendue, qui est solidairement concernée par les cycles qu'elle produit, de la même façon que le nombre des oscillations d'un pendule est *le même* à chacune des deux extrémités de sa course, ou que le nombre de fois qu'on retourne un sablier est *le même* pour chacune de ses deux fioles, ou que le nombre de fois qu'une aiguille fait le tour d'un cadran est *le même* en tout point du cadran.

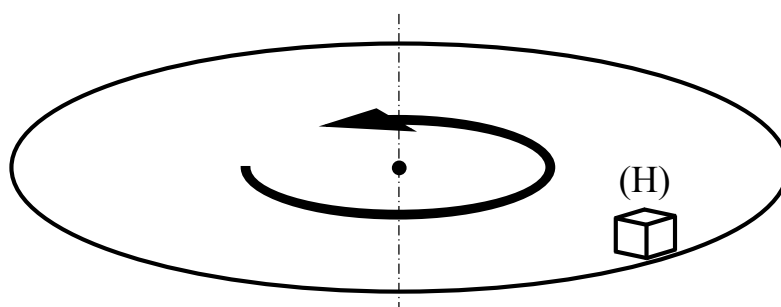
Ce « *le même* » doit être précisé puisqu'aucun observateur n'a le don d'ubiquité et ne peut être à la fois en deux lieux M et M' d'une horloge (H) ayant une expansion spatiale non nulle. Une solution est de faire faire régulièrement la navette entre M et M' à un observateur, qui observe ainsi alternativement les nombres n et n' de cycles effectués par l'horloge en ces lieux.

Du point de vue de la modélisation, un « observateur » est un point historicisé.

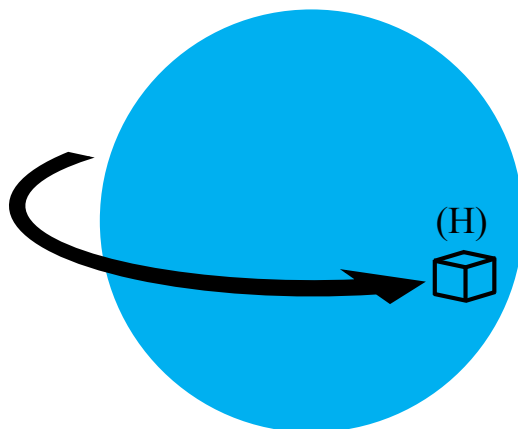


Si on fait tendre le temps d'observation vers l'infini, les durées des trajets de M à M' deviennent négligeables (car on peut supposer la durée des allers et retours bornée, qu'elle soit mesurée en M ou en M'). Nous disons que n et n' sont « les mêmes » si leur différence reste bornée quand n ou n' tendent vers l'infini.

Cette horloge étendue parcourue par des cycles réguliers, posons-la sur le plateau tournant à vitesse uniforme qu'utilise Einstein dans *la Relativité*, et observons-la.



Ou plutôt, comme l'ont fait Hafele et Keating en 1971⁸, embarquons-la à bord d'avions de ligne faisant le tour de la Terre.



Le résultat de cette expérience, comme d'autres portant sur des particules assimilables à des horloges lorentziennes en mouvement, confirme le formulaire de la relativité restreinte : un ralentissement du rythme de l'horloge est observé, qui, en tenant compte de la marge d'incertitude et d'une correction due à ce que la Terre n'est pas de masse négligeable, est conforme aux prédictions de la théorie.

Toutefois, une difficulté se présente. Imaginons que cette expérience perdure indéfiniment, dans des conditions parfaites. Le mouvement de l'avion est éternel et absolument régulier, et la situation se reproduit à l'identique tour après tour.

(H) est une horloge, une machine censée produire des cycles réguliers qui ont la même durée en chacun de ses points, de la même façon que le nombre de tours d'une aiguille sur un cadran de montre est le même en chaque point du cadran. Or les points de (H) ne vont pas tous à la même vitesse relativement à l'espace galiléen (E) dans lequel tourne l'avion. Si M est celui qui est le plus éloigné du centre de la Terre et M' celui qui en est le plus proche, M va plus vite que M', et les cycles de l'horloge, s'ils ont la même durée propre en M et en M', sont, quand on les considère depuis (E), tels que celui se déroulant en M est plus long que celui se déroulant en M'. La différence est évidemment minuscule, mais la rigueur mathématique porte infiniment au-delà la milliardième décimale ; et de toute façon

⁸ J.C. Hafele et Richard E. Keating, Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains, Science, vol. 177, n° 4044, pp 168-170, juillet 1972.

l'éternité postulée de l'expérience permet d'amplifier autant que nous le voulons cette infime différence. Même si l'horloge n'a qu'un micron d'épaisseur et si l'avion va à la vitesse d'un escargot cardiaque, les durées lues dans (E) aux deux points M et M' de (H) doivent avoir une différence qui tend vers l'infini quand on fait tendre vers l'infini la durée de l'expérience. On n'observe évidemment rien de tel.

Considérons en effet l'horloge depuis (E) à un instant t de cet espace. Elle affiche n tours en M et n' tours en M'. Un observateur faisant le va-et-vient entre M et M' arrive en M à cet instant-là. Lors de son précédent passage en M' il a lu n'' tours à l'horloge. Comme ce passage, considéré depuis (E), est antérieur à t , et que l'horloge ne recule pas, on a $n'' < n'$. La différence des durées lues sur l'horloge en M' et en M aux deux extrémités d'un même trajet est majorée par la constante A, d'où $n'' \geq n - A$. On en déduit que $n' > n - A$, et de la même façon que $n > n' - B$. Donc $|n - n'|$ est majoré et ne peut tendre vers l'infini quand la durée de l'expérience tend vers l'infini.

Aussi la théorie, pour échapper à une contradiction, est forcée de se déjuger : les cycles temporellement solidaires fournis par cette horloge en rotation, *et perçus tels par tous les observateurs*, ceux qui sont dans l'avion comme ceux qui sont restés au sol, comme ceux qui sont entre-temps allés faire un tour à l'autre bout du cosmos, ces cycles doivent avoir à présent une « durée propre » qui n'est plus la même en chacun de ses lieux, qui dépend de leur distance à l'axe de rotation, *et qui ne correspond à rien d'observable*. Voilà donc que ce qui était une horloge n'en est maintenant plus une. La théorie n'évite une conclusion inacceptable qu'au prix d'un reniement épistémologique.

.....

5 – CONCLUSION

L'absence de définition instrumentale efficiente de l'horloge, et son remplacement par une fiction d'horloge idéalement ponctuelle, alors même qu'une définition efficiente est possible, et que les deux autres instruments utilisés par Einstein sont définis de façon claire et efficiente, est donc bien autre chose qu'un simple oubli : c'est une nécessité. *La relativité restreinte est dans l'incapacité de définir ses horloges*. Elle ne peut que faire semblant de le faire, en installant à sa

place un instrument factice que le nom d'« horloge » déguise en instrument véritable.

On peut s'interroger sur l'utilité d'une telle « horloge ». Pourquoi ne pas la faire disparaître, puisqu'elle est vide ? Mais alors son absence serait flagrante et on ne comprendrait pas pourquoi il y aurait un instrument pour construire la géométrie, un pour construire la simultanéité, et aucun pour construire la mesure des durées. On le comprendrait d'autant moins que la théorie lie indissolublement l'espace et le temps en « espace-temps », et que cette solidarité des deux, qui leur confère des natures analogues, réclame des mises en place analogues. Si on fait disparaître l'« horloge », il faut faire disparaître aussi la règle à mesurer. Et si les deux disparaissent, on ne voit pas comment le vérificateur de simultanéité pourrait se maintenir. Le principe de fondation sur l'instrument et l'expérience n'est pas de ceux qu'on peut respecter à moitié. C'est tout ou rien.

Serait-il possible à Einstein d'installer sa cinématique sans s'appuyer sur aucun instrument ? Il est clair que non. Le respect – au moins apparent – de l'exigence de fondation sur l'instrument et l'expérience lui est indispensable. C'est en effet ce qui lui permet de substituer à l'espace, au temps et à la simultanéité absolus, existant « en eux-mêmes », des notions spatiotemporelles qui ne sont rien de plus que ce que l'observateur en observe avec ses instruments. Aussi donne-t-il le mieux qu'il peut l'apparence de souscrire à cette exigence, et probablement se trompe-t-il lui-même en croyant qu'il le fait pour de vrai.

Cependant, maintenant que nous avons compris que sur les trois instruments deux seulement sont corrects, et que son horloge n'est que le déguisement d'une absence, maintenant que nous avons vu cette faille épistémologique et constaté qu'elle n'est pas réparable dans le cadre de la théorie, nous savons avec certitude que la relativité restreinte n'est pas à l'abri de tout reproche⁹, et qu'il faut la remettre

⁹ Nous le savons avec d'autant plus de certitude

– que nous l'avons montré d'une autre façon, par l'analyse de l'expérience d'aller et retour d'un cylindre élastique en rotation dans le cadre relativiste lorentzien ;

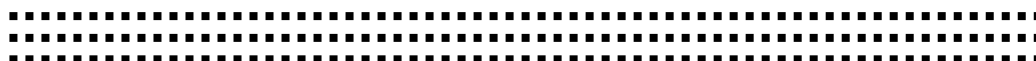
– qu'il n'existe à ce jour aucune preuve de la solidité logique de la mécanique relativiste lorentzienne des corps élastiques, comme il en existe depuis fort longtemps pour les géométries non-euclidiennes ;

– que, dans l'article *Preuve de solidité logique de la non-relativité lorentzienne* (hal-00981033), nous avons mis en évidence que la preuve donnée ne peut pas s'appliquer à la relativité restreinte.

sur le métier pour la rendre capable d'assumer une horloge efficiente, qui explicitera son mécanisme et le principe ou la loi de base qui lui font fournir un temps régulier.

Mais ces difficultés soulevées par l'horloge ne doivent pas nous faire oublier un point essentiel, la solidité expérimentale de la théorie, qui fait qu'on ne peut lui substituer qu'une théorie presque jumelle, également fondée sur une cinématique lorentzienne de paramètre C . Nous avons déjà étudié cette question et montré¹⁰ qu'il fallait abandonner la valeur universelle du principe de relativité en pointant un espace particulier, l'espace isotrope local. Du coup, longueurs durées, et instants relatifs à cet espace prennent une valeur objective. Le formulaire cinématique reste inchangé, mais son interprétation n'est plus la même. Le « temps propre » d'un objet, celui relatif à l'espace galiléen tangent à son mouvement, cesse d'être un concept pertinent, au profit du temps « objectif », celui relatif à l'espace isotrope.

Or tel est bien ce à quoi conduit l'expérience de pensée de l'horloge non ponctuelle tournant indéfiniment, comme celle du plateau tournant d'Einstein ou comme l'idéalisation éternelle de l'expérience de Hafele et Keating : la pluralité des « temps propres » attribués aux différents points de l'horloge selon leur distance au centre de rotation ne correspond à aucune réalité pertinente.



¹⁰ *La Modification minimale à apporter à la relativité restreinte pour qu'elle supporte l'expérience d'aller et retour d'un cylindre en rotation*, hal-00976517.

TABLE DES MATIÈRES

1 – LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET L'EXIGENCE DE FONDATION SUR L'INSTRUMENT ET L'EXPÉRIENCE	1
2 – L'ÉTRANGE DISPARITÉ DES INSTRUMENTS EINSTEINIENS	2
3 – EST-IL POSSIBLE DE DÉFINIR L'HORLOGE EN TANT QU'INSTRUMENT EFFECTIF ?.....	6
4 – EN RELATIVITÉ RESTREINTE, EST-IL POSSIBLE DE DÉFINIR UNE HORLOGE EFFECTIVE ?	9
5 – CONCLUSION	12